

УДК 681.518.622.248:004.94

# ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ АВТОМАТИ- ЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ПОРОДО- РУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТУ

**І. І. Чигур**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра автоматизації технологічних  
процесів і моніторингу в екології  
Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15,  
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019  
E-mail: chygur@gmail.com

*У статті розглянуто основні фактори, які впливають на достовірність результатів автоматизованого контролю стану породоруйнівного інструмента в процесі буріння свердловин на нафту і газ. Аналіз роботи запропонованої автоматизованої системи виявив найбільш відповідальні підсистеми, вплив яких на достовірність кінцевого результату найбільший. Запропоновано застосувати технології штучного інтелекту для реалізації алгоритмів роботи цих підсистем*

*Ключові слова: контроль, система, стан, буріння, ідентифікація, розпізнавання, прогнозування, породоруйнівний, долото, достовірність*

*В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на достоверность результатов автоматизированного контроля состояния породоразрушающего инструмента в процессе бурения скважин на нефть и газ. Анализ работы предложенной автоматизированной системы выявил наиболее ответственные подсистемы, влияние которых на достоверность конечного результата наибольшее. Предложено применить технологии искусственного интеллекта для реализации алгоритмов работы этих подсистем*

*Ключевые слова: контроль, система, состояние, бурение, идентификация, распознавание, прогнозирование, породоразрушающий, долото, достоверность*

## 1. Вступ

Одним із основних факторів підвищення ефективності процесу буріння свердловин на нафту і газ є забезпечення працездатності технологічного обладнання до якого відноситься і породоруйнівний інструмент, і забезпечення режимів його роботи у відповідності з вимогами технологічного регламенту.

Основними породоруйнівними інструментами, які на даний час використовуються для буріння свердловин є шарошкові та алмазні долота. У процесі роботи елементи доліт зношуються: в шарошкових долотах – опори та озброєння, в алмазних – озброєння. Зношене долото підлягає підйому на поверхню для заміни. Зважаючи на глибину буріння (більше 3000 м), його вартість та вартість породоруйнівного інструменту (для алмазних доліт – 50 000 \$ і більше), задача ефективного відпрацювання породоруйнівного інструменту та визначення оптимального моменту часу для його заміни в зв'язку із зношенням є актуальною і від її вирішення залежить економічна ефективність і безпечність процесу будівництва свердловини.

## 2. Аналіз літературних джерел

Породоруйнівний інструмент відноситься до класу складних об'єктів нафтогазовидобувної промисловості, що функціонує в умовах інформаційної невизначеності [1], у зв'язку із чим оператору-буровику важко

оперативно оцінити його стан за наявними інформаційними ознаками на гирлі свердловини.

Основними ознаками складності є наступні [2]:

- стохастичність поведінки і складність математичного опису;
- нестационарність режимів роботи;
- неповна відтворюваність експериментів;
- велика кількість нерегламентованих станів;
- часові обмеження на контроль і діагностику стану об'єкта.

У зв'язку з цим актуальною є задача розробки автоматизованої системи контролю стану породоруйнівного інструменту на вибої свердловини і прийняття відповідних дій для попередження небажаних наслідків, таких як катастрофічне зношення, утворення передаварійних ситуацій і ускладнень, що можуть виникнути в процесі буріння при взаємодії долота з гірськими породами вибою свердловини.

Аналіз робіт виявив, що існує два основних класи методів контролю стану породоруйнівного інструменту – контактні і безконтактні [1, 3]. З проаналізованих методів найбільшого застосування знайшли безконтактні методи контролю з використанням різних критеріїв [2, 4, 5], як такі, що володіють більшою точністю і достовірністю, однак їхнє застосування обмежене стаціонарними умовами буріння. Іншим шляхом отримання інформації про ресурс породоруйнівного інструменту є аналіз вібраційних сигналів колони бурильних труб на гирлі свердловини [6, 7], однак недоліком цього методу є зменшення достовірності

контролю із зростанням глибини буріння. Для підвищення достовірності контролю стану доліт запропоновано [8] доповнити існуючі критерії інтелектуальними моделями виявлення катастрофічного зношення породоруйнівного інструмента, які базуються на використанні нечислової інформації про процес буріння.

Однак розглянуті методи не враховують специфіку побудови загальної системи автоматизації процесом буріння свердловин як єдиної системи, що виконує функції контролю, розпізнавання, оцінки стану, прогнозування і прийняття рішень.

З урахуванням вищевикладеного виникає необхідність у розробці комплексної системи контролю і керування процесом буріння свердловин породоруйнівним інструментом в реальних промислових умовах.

### 3. Мета і задачі дослідження

Метою даної статті є підвищення ефективності управління процесом буріння нафтових і газових свердловин породоруйнівними інструментами різних типів шляхом отримання достовірної інформації про їх реальний технічний стан на вибої свердловини.

Основною задачею, яка вирішується в даній роботі, є оцінка факторів, що впливають на достовірність результатів роботи автоматизованої системи контролю стану породоруйнівного інструменту та виявлення шляхів її підвищення.

### 4. Загальні принципи автоматизованого контролю стану породоруйнівного інструмента

Основними задачами, які вирішує системи автоматизованого контролю за процесом відпрацювання породоруйнівного інструменту є [1]:

- забезпечення неперервного спостереження за станом об'єкта контролю;
- забезпечення своєчасного і достовірного прийняття рішень в процесі роботи і вибір стратегії по попередженню і ліквідації наслідків від регламентованих станів об'єкта контролю;
- забезпечення зміни параметрів процесу буріння у відповідності до зміни стану контрольованого об'єкта.

Стан породоруйнівного інструмента як об'єкта контролю характеризується сукупністю поточних значень його атрибутів (параметрів) і зв'язків [1, 8, 9]. У процесі функціонування складові об'єкта (озброєння, опори) взаємодіють між собою та з розбурюваними породами, в результаті чого змінюється їхній стан та стан об'єкта в цілому. Ця зміна є подією. Параметричні ознаки цієї події є подібними до ознак подій, викликаних впливом на об'єкт зовнішніх керуючих чи збурюючих факторів, до яких відносяться зміна осьового навантаження на долото, зміна частоти його обертання, зміна витрати промивальної рідини, зміна фізико-механічних властивостей розбурюваних порід та інші. Послідовність подій і відповідних їм станів може бути відображена у вигляді діаграми подій та станів об'єкта. Поява подій і станів може відбуватися в детерміновані та випадкові моменти часу.

У загальному випадку вся множина станів породоруйнівного інструменту як об'єкта контролю може

бути за ознакою регламентованості поділена на два класи: клас регламентованих станів (працездатний стан) і нерегламентованих станів (зношення породоруйнівного інструменту, передаварійні стани та можливі ускладнення) [1]. Множина нерегламентованих станів у свою чергу по ознаці аварійності поділяється на два класи: клас станів, що передують аварійній ситуації та клас аварійних ситуацій. За ознакою складності клас нерегламентованих станів можна поділити на підкласи простих і складних станів. Прості стани відповідають режиму роботи об'єкта контролю, коли в нерегламентованому стані знаходиться не більше однієї структурної одиниці об'єкта, наприклад зношення або озброєння, або опор долота. Для складних станів характерним є наявність у нерегламентованому стані двох і більше складових одиниць об'єкта (наприклад одночасне зношення опор і озброєння шарошкового долота). За ознакою сумісності всі прості стани можна розділити на сумісні та несумісні. При цьому до сумісних станів відносяться ті прості стани, які можуть в сукупності створювати складні стани.

Кожен стан об'єкта контролю характеризується певним набором вхідних параметрів, які можуть бути виміряні та проаналізовані на вибої свердловини відповідними технічними засобами.

### 5. Оцінка достовірності автоматизованого контролю стану породоруйнівного інструменту

З урахуванням того, що задачею системи контролю є визначення належності досліджуваного стану до одного з класів стану – регламентованого або нерегламентованого і прийняття відповідних дій, цільову функцію системи контролю можна представити в наступному вигляді [10]:

$$E = \sum_{i=1}^M N_i \left\{ [e_i - (1 - \alpha) + z_{\alpha,i} \alpha] \cdot P_i + [e_j (1 - \beta) + z_{\beta,i} \beta] \cdot P_j \right\}, \quad (1)$$

де  $M$  – кількість контрольованих нерегламентованих станів об'єкта;  $N_i$  – кількість перевірок стану об'єкта протягом часу роботи об'єкта контролю  $T$ ;  $e_i$  та  $e_j$  – ефект від правильного прийняття рішення, при контролі  $i$ -го нерегламентованого та  $j$ -го регламентованого станів об'єкта;  $z_{\alpha,i}$  та  $z_{\beta,i}$  – коефіцієнти додаткових витрат від помилкового прийняття рішення, викликаного  $\alpha$  та  $\beta$  помилками відповідно першого та другого роду при діагностуванні  $i$ -го стану об'єкта;  $P_i$  та  $P_j$  – апріорні ймовірності виникнення  $i$ -го нерегламентованого та  $j$ -го регламентованого станів.

З виразу (1) можна зробити висновок, що параметрами, які характеризують достовірність прийняття рішень в системі автоматизованого контролю є параметри  $\alpha$  та  $\beta$ , які є узагальненими, оскільки рішення в системі приймається на основі сумісної роботи підсистем ідентифікації, розпізнавання, прогнозування та вибору стратегії керування.

Середню статистичну оцінку  $R$  загальної достовірності прийняття рішень в розглянутій системі за умови, що інформативність сигналів від об'єкта контролю є незмінною, можна визначити як середню між  $\alpha$  та  $\beta$ :

$$R = \frac{\alpha + \beta}{2} \tag{2}$$

Враховуючи те, що загальна достовірність системи залежить від достовірності роботи підсистем, що входять в неї, то загальну достовірність прийняття рішення можна представити наступним чином:

$$R = R_1 R_2 R_3 R_4, \tag{3}$$

де співмножники  $R_1, R_2, R_3, R_4$  характеризують достовірність прийняття рішень відповідно на етапах ідентифікації, розпізнавання, прогнозування та вибору стратегії керування. Кожен із параметрів виразу (3) визначається з врахуванням специфіки конкретної підсистеми.

Задача підсистеми ідентифікації – виявити стан породоруйнівного інструмента, який не відповідає номінальному і потребує додаткового розпізнавання. Робота цієї підсистеми базується на аналізі відхилень біжучих значень технологічних параметрів процесу буріння  $G$  від їх заданих значень  $G_u$ .

Достовірність  $R_1$ , а отже і якість функціонування підсистеми залежить крім  $G$  та  $G_u$  ще і від періоду спостереження  $\Delta T$  та часу контролю  $\Delta t_1$ . З врахуванням (2) параметричну залежність достовірності  $R_1$  можна записати:

$$R_1 = \{ \alpha_1, \beta_1, G, G_u, \Delta T, \Delta t_1 \}. \tag{4}$$

Параметри  $\Delta T$  та  $\Delta t_1$  при використанні сучасних технічних засобів неперервного контролю та систем обробки інформації, близькі до нульових значень і не впливають на результати ідентифікації, тому вважаємо, що:

$$R_1 = \{ \alpha_1, \beta_1, G, G_u \}. \tag{5}$$

Правило, яке визначає необхідність розпізнавання стану об'єкта контролю, має наступний вигляд:

$$q^* = \begin{cases} Q_A, G^* > G_u, \\ Q_B, G^* \leq G_u, \end{cases} \tag{6}$$

де  $q^*$  – множина станів об'єкта контролю, що ідентифікується;  $Q_A$  – регламентований (працездатний) стан – не потребує розпізнавання;  $Q_B$  – нерегламентовані стани – потребують розпізнавання;  $G^*$  – біжучі значення контрольованих параметрів процесу буріння.

Параметр  $G_u$ , як правило, задається технологіями операторами і залежить від конкретної свердловини та умов буріння. В зв'язку з цим основна помилка підсистеми ідентифікації обумовлюється похибками вимірювання групи контрольованих параметрів  $G$ , а також апаратними збоями. Ця помилка не залежить від стану об'єкта контролю  $q^*$  і є незрівнянно малою по відношенню до помилок підсистем розпізнавання чи прогнозування [10], тому можна вважати її рівною нулю, тобто  $\alpha_1 \approx 0$  і  $\beta_1 \approx 0$ . Таким чином достовірність результатів підсистеми ідентифікації можна вважати наступною:

$$R_1 = 1 - \frac{\alpha_1 + \beta_1}{2} \approx 1. \tag{7}$$

Задача підсистеми розпізнавання – визначити належність досліджуваного стану контрольованого об'єкта до одного з підкласів нерегламентованих станів. Достовірність розпізнавання  $R_2$  визначається помилками першого  $\alpha_2$  та другого  $\beta_2$  роду і може бути оцінена згідно виразу (2). В свою чергу  $\alpha_2$  та  $\beta_2$  залежать від таких параметрів як ймовірнісна інформативність ознаки розпізнавання  $P_s$  та часу розпізнавання  $\Delta t_2$ , тобто

$$(\alpha_2, \beta_2) = f(P_s, \Delta t_2). \tag{8}$$

Із врахуванням (2), останній вираз можна представити так:

$$R_2 = f(P_s, \Delta t_2). \tag{9}$$

Параметр  $P_s$  характеризує ймовірність правильного розпізнавання при використанні деякої інформативної ознаки. При наявності декількох ознак в якості  $P_s$  пропонується використати середню для цих ознак величину.

Вид функції (9) залежить від методу розпізнавання. При розпізнаванні деякої множини станів  $M$  (1) загальний час однієї процедури розпізнавання  $\Delta t_2$  залежить від кількості контрольованих станів, що включені в процедуру, часу розпізнавання кожного стану  $\Delta t(q_i)$  і визначається як:

$$\Delta t_2 = \sum_{i=1}^M \Delta t(q_i), \quad q_i \in Q_B. \tag{10}$$

Задача підсистеми прогнозування полягає в прогнозуванні залишкового ресурсу породоруйнівного інструменту, що знаходиться в нерегламентованому стані.

Оцінка якості роботи цієї підсистеми в значній мірі залежить від співвідношення стохастичності і детермінованості прогнозованого стану.

Достовірність прогнозу може бути оцінена по ймовірнісній величині надійності прогнозу  $\gamma$ , що визначається за допомогою виразу для параметру статистики Стьюдента  $t_a$  і таблиць  $t$  – розподілу, в яких приведені значення  $\gamma$  для відомих  $t_a$ :

$$t_a = \frac{\Delta \sqrt{n-1}}{S_o}, \tag{11}$$

де  $\Delta$  – допустиме відхилення від заданої точності прогнозу;  $n$  – кількість досліджуваних прогнозів;  $S_o$  – оцінка середнього квадратичного відхилення прогнозних значень.

Таким чином, загальну достовірність результатів роботи підсистеми прогнозування можна оцінити наступним чином:

$$R_3 = \gamma. \tag{12}$$

Задачею підсистеми вибору стратегії керування є визначення оптимальної стратегії  $S_o$  по попередженню і ліквідації наслідків нерегламентованих станів, викликаних роботою породоруйнівного інструмента, таких як прихоплення бурильної колони, обвал сті-

нок свердловини та інші. Початковими даними для вирішення цієї задачі є результати роботи підсистеми прогнозування  $N_3$ .

Таким чином вибір оптимальної стратегії  $S_0$  здійснюється згідно наступного правила:

$$S_0 = F_0(N_3, S) = \max\left(\frac{e}{z}\right), S_0 \in S, F_0 \in F, \quad (13)$$

де  $F_0$  – функціонал вибору оптимальної стратегії з множини можливих функціоналів  $F$ ;  $e$  і  $z$  – відповідно економія і витрати у вигляді збитків від використання конкретної стратегії, які входять у вираз цільової функції (1);  $S$  – множина можливих стратегій, визначених експертами-бурильниками.

Як видно з (13), вибір оптимальної стратегії визначається функціоналом  $F_0$  і параметрами  $N_3$  і  $S$ . Множина  $S$  по відношенню до  $N_3$  є фіксованою протягом деякого інтервалу часу, тому якість вибору стратегії визначається видом  $F_0$  і початковими даними  $N_3$  достовірність яких оцінюється величиною (12).

Отже, достовірність  $R_4$  вибору оптимальної стратегії визначається як функція:

$$R_4 = f(F_0(N_3)). \quad (14)$$

Таким чином, проаналізувавши (1), (7), (9), (11), (12), (14) можна зробити висновок, що основними параметрами автоматизованої системи контролю стану породоруйнівного інструмента в процесі буріння свердловин, які мають вплив на достовірність результатів контролю, є  $M, N_i, P_i, P_s, S_\sigma$ . Ці параметри мають ймовірнісний характер і змінюються в деякому діапазоні з цих параметрів тільки  $P_s, S_\sigma$ , що відповідають підсистемам розпізнавання та прогнозування відповідно, характеризують роботу системи, всі інші

є зовнішніми по відношенню до неї і не залежать від алгоритму роботи самої системи.

## 6. Висновки

Проведена оцінка факторів, які впливають на достовірність результатів роботи автоматизованої системи контролю стану породоруйнівного інструмента, дозволила встановити, що найбільший вплив на результат контролю мають наступні параметри системи і об'єкта контролю:

- $M$  – кількість контрольованих нерегламентованих станів об'єкта;
- $N_i$  – кількість перевірок стану об'єкта протягом часу роботи об'єкта контролю  $T$ ;
- $P_i$  – апіорна ймовірність виникнення  $i$ -го нерегламентованого стану об'єкта;
- $P_s$  – ймовірність правильного розпізнавання стану об'єкта при використанні інформативної ознаки;
- $S_\sigma$  – оцінка середнього квадратичного відхилення прогнозних значень станів об'єкта контролю.

Встановлено, що з цих параметрів тільки  $P_s, S_\sigma$ , які відповідають підсистемам розпізнавання та прогнозування, відповідно, характеризують роботу системи, всі інші є зовнішніми по відношенню до неї і не залежать від алгоритму її роботи.

У результаті проведених досліджень виявлено, що основними шляхами підвищення достовірності результатів роботи запропонованої системи є збільшення ймовірності правильного розпізнавання стану об'єкта та зменшення відхилення прогнозних значень станів об'єкта від реальних. У зв'язку з цим для реалізації алгоритмів розпізнавання та прогнозування автоматизованої системи контролю пропонується застосувати нейро- та фаззі- технології штучного інтелекту, які довели свою ефективність у подібних завданнях [1, 8].

## Література

1. Семенцов, Г. Н. Основні концепції створення автоматизованої системи контролю за технічним станом породоруйнівного інструменту [Текст] / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 1. – С. 61–63.
2. Семенцов, Г. Н. Математичний аналіз критеріїв відпрацювання доліт [Текст] / Г. Н. Семенцов, М. І. Горбійчук, І. І. Чигур // Нафтова і газова промисловість. – 2001 – № 6. – С. 15–19.
3. Шагеев, А. Ф. Автоматизированный мониторинг процессов обработки скважин – первая ступень интеллектуальных систем управления [Текст] / А. Ф. Шагеев, А. М. Тимушева, Л. Н. Шагаева, А. С. Гришин / Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 11. – С. 48–49.
4. Беликов, В. Г. Рациональная отработка и износостойкость шарошечных долот [Текст] / В. Г. Беликов, С. А. Посташ. – М.: Недра, 1972. – 160 с.
5. Бареев, М. Б. О критериях износостойкости вооружения долот [Текст] / М. Б. Бареев, И. И. Астафьев // Нефтяное хозяйство. – 1991. – № 7 – С. 7–10.
6. Zhu, X. Analysis of reamer failure based on vibration analysis of the rock breaking in horizontal directional drilling [Text] / X. Zhu, Y. Liu, H. Tong // Engineering Failure Analysis. – 2014. – Vol. 37. – P. 64–74. doi:10.1016/j.engfailanal.2013.11.016
7. Tang, J. A new method of combined rock drilling [Text] / J. Tang, Y. Lu, Z. Ge, B. Xia, H. Sun, P. Du // International Journal of Mining Science and Technology. – 2014. – Vol. 24, Issue 1. – P. 1–6. doi:10.1016/j.ijmst.2013.12.001
8. Чигур, І. І. Розробка методу контролю технічного стану шарошкових доліт в умовах невизначеності процесу буріння [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / І. І. Чигур. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2000. – 20 с.
9. Ситников, Н. Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / Н. Б. Ситников. – Уральская государственная горно-геологическая академия. – Екатеринбург, 2000. – 41 с.
10. Аралбаев, Т. З. Методы и средства построения адаптивных систем мониторинга и диагностирования сложных промышленных объектов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Т. З. Аралбаев. – Оренбургский государственный университет. – Оренбург, 2004. – 32 с.